

Ю.И. ПОДЪЯЧИЙ, канд. физ.-мат. наук, доц., НТУ “ХПИ”

РАКЕТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Предложена методика обработки данных зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния с целью выделения возмущений сечения рассеяния ионосферной плазмы после стартов мощных ракет-носителей. Приведены примеры обработки реальных данных зондирования ионосферы над Харьковом во время запусков ракет с космодрома Байконур.

Ключевые слова: ионосфера, некогерентное рассеяние, ионосферные возмущения, запуски ракет, методики обработки данных зондирования.

Постановка проблемы. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн широко используется для исследования регулярной структуры ионосферы. С помощью радаров НР одновременно в большом диапазоне высот измеряют основные параметры ионосферной плазмы – электронную концентрацию, электронную и ионную температуры, скорость дрейфа заряженных частиц, частоты столкновений и многое другое. Также хорошо известны успехи, достигнутые с помощью метода НР, в изучении ионосферных возмущений естественной природы. Наиболее значительные результаты в этом направлении получены в исследованиях перемещающихся ионосферных возмущений, вызываемых внутренними гравитационными волнами с периодами от 30 минут до 3 часов. В частности, на основе экспериментальных данных, полученных методом НР, создана физическая модель образования и распространения таких возмущений и оценен их вклад в энергетический баланс ионосферы.

Менее известны результаты исследования методом НР антропогенных ионосферных возмущений, вызываемых, в частности, запусками баллистических ракет, строительными взрывами большой мощности, подземными ядерными взрывами и прочими явлениями человеческой деятельности, сопровождающимися выделением в окружающую среду значительной энергии за относительно небольшое время. Научные публикации по этому вопросу сравнительно немногочисленны, хотя этот аспект проблемы ионосферных исследований представляет несомненный интерес как для теории образования и динамики ионосферы, так и для различных практических приложений.

В Институте ионосферы НАН и МОН Украины исследование ионосферных возмущений, вызванных ракетными пусками, ведется около 40 лет. За это время накоплен определенный опыт в проведении зондирования ионосферы, в применении обычных и специальных

© Ю.И. Подъячий, 2013

аппаратурных режимов, использовании различных методик обработки данных. Можно с определенной долей уверенности констатировать, что основной проблемой на сегодняшний день является обработка данных зондирования с целью выделения возмущений ионосферы, вызванных запуском ракеты, на фоне естественных возмущений ионосферы. Для решения этой задачи часто используются апробированные во многих экспериментах надежные методики спектрального анализа, которые, тем не менее, отличаются определенной сложностью в практической реализации. В данной статье предлагается достаточно простая методика обработки первичных данных, которая, как показывают примеры ее использования, дает хорошие результаты при регистрации ионосферных возмущений после запусков тяжелых ракет-носителей. Для иллюстрации этого в статье приводятся результаты наблюдений методом НР ионосферных возмущений непосредственно после запусков с российского космодрома Байконур ракет носителей "Протон" и "Союз".

Анализ литературы. Проблема влияния запусков мощных ракет-носителей на состояние ионосферы исследуется во многих организациях уже несколько десятилетий. При этом регистрация возмущений ионосферной плазмы осуществляется методами НР, вертикального зондирования, вертикального доплеровского зондирования, спутниковыми методами и др. [1 – 9, 12]. Обнаружение ракетных возмущений на фоне естественных вариаций параметров ионосферной плазмы производится современными методами – адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и аналитического вейвлет-преобразования (АВП) [10, 11]. Выявлены три группы возмущений, имевшие зависящие от времени суток запаздывания 6 – 7, 30 – 70 и 70 – 130 мин.

Цель статьи – разработка достаточно простой и прозрачной методики обработки данных зондирования ионосферы методом НР во время запусков мощных космических ракет и выделение сопутствующих им ионосферных возмущений на фоне естественных вариаций параметров ионосферной плазмы. Для иллюстрации возможностей предложенной методики приводятся примеры обработки данных зондирования во время запусков российских космических ракет.

Методика обработки данных зондирования. При зондировании ионосферы с помощью радара НР измеряется автокорреляционная функция рассеянного сигнала и/или его мощность. В первом случае с помощью специальной достаточно сложной процедуры обработки принятого сигнала можно оценить большинство ионосферных параметров – концентрацию, кинетическую температуру электронов и основных ионов, частоту столкновений заряженных частиц с нейтральными, скорость дрейфа плазмы и пр. Для измерения электронной концентрации и температур с погрешностью не более 10 – 20% необходимо накапливать сигнал в течение 10 – 15 мин в зависимости от условий. Такое временное разрешение в

большинстве случаев непригодно для регистрации антропогенных ионосферных возмущений.

Для этой цели была разработана методика оценки обобщенного параметра ионосферы – относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы. Для однородной ионосферы этот параметр определяется выражением

$$\sigma_0(h) = \frac{kN_e(h)}{1 + T_e/T_i}, \quad (1)$$

где $N_e(h)$, $T_e(h)$, $T_i(h)$ – высотные распределения электронной концентрации, электронной и ионной температуры в ионосфере, k – коэффициент пропорциональности, определяемый характеристиками аппаратуры. Сечение рассеяния зависит также и от наличия в плазме неоднородностей электронной концентрации.

Мощность некогерентно рассеянного сигнала при $T_e = T_i$ можно записать в виде $P_C(h) = k\sigma(h)/h^2$ или $P_C/P_{\text{ш}} = k_1\sigma_0(h)/h^2$. Отсюда сечение рассеяния в относительных единицах $\sigma_0(h) = q(h) \cdot h^2$, где $q(h) = P_C(h)/P_{\text{ш}}$, а $P_{\text{ш}}$ – мощность шума. Следовательно, для оценки относительного сечения рассеяния σ_0 достаточно измерить отношение мощности рассеянного сигнала к мощности шума и знать высоту рассеяния h . Следует отметить, что относительная погрешность оценки σ_0 в 2 раза больше, чем погрешность оценки мощности сигнала. При накоплении рассеянного сигнала в течении 1 мин погрешность оценки относительного сечения рассеяния не превышает 1 – 5%.

Исходными данными для обработки являются файлы высотных профилей отношения мощностей сигнала некогерентного рассеяния и шума, накопленных в течение сеанса измерения длительностью 1 мин. Каждое значение отношения $q(h) = P_C(h)/P_{\text{ш}}$ умножается на величину $(h[\text{км}]/100)^2$. Получаемая в результате величина $\sigma_0(h) = q(h)(h/100)^2$ является сечением рассеяния ионосферной плазмы, измеренным в относительных единицах. По этим данным строятся графики зависимостей сечения рассеяния от времени на постоянных высотах: $\sigma_0 = \sigma_0(t)$ при $h = \text{const}$. Затем проводится визуальный анализ графиков $\sigma_0(t, h)$ с целью отбраковки "испорченных" сеансов измерения. В таких сеансах величина относительного сечения рассеяния на всех высотах чаще всего превосходит значение σ_0 в соседних по времени сеансах в несколько раз (реже – уменьшается практически до нуля). Данные этих сеансов заменяются средним значением предыдущего по времени и последующего сеансов на соответствующих высотах. Следует отметить, что таких "испорченных" профилей относительно немного. На следующем этапе обработки вычисляется скользящая дисперсия флуктуаций сечения рассеяния. На каждой высоте для первых N сеансов вычисляется дисперсия флуктуаций по формуле

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\sigma_{0,i} - \bar{\sigma}_0)^2,$$

где $\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{0,i}$ – среднее значение сечения рассеяния в выбранных N

сеансах. Затем вычисляется дисперсия для следующих N сеансов, сдвинутых по номеру на единицу. Значение N может изменяться.

Такая обработка позволяет выявить интенсивные флуктуации сечения рассеяния ионосферной плазмы, вызванные ракетным стартом, на фоне естественных флуктуаций, имеющих гораздо меньшую интенсивность. Если вариации параметров ионосферы, вызванные стартом, по интенсивности сравнимы с естественными вариациями или даже меньше их, то такая методика не позволит обнаружить ракетные ионосферные возмущения.

Ионосферные возмущения, зарегистрированные после старта РН “Протон-К”. *Краткие сведения о ракете.* “Протон-К” (УР-500, 8К82) – ракета-носитель тяжёлого класса, предназначенная для выведения автоматических космических аппаратов на орбиту Земли и далее в космическое пространство. В зависимости от модификации ракета способна вывести 20 – 22 т полезной нагрузки на орбиту высотой 200 км. Стартовая масса – 700 т. Тяга двигательной установки: первой ступени – 9500 кН, второй ступени – 2300 кН, третьей ступени – 583 кН. Продолжительность работы двигателей первой ступени составляет 130 с, второй – 230 с, третьей – 250 с. Общее время работы маршевых двигателей – около 10 мин. Запуски осуществляются только с космодрома Байконур.

25 декабря 2006 года на исследовательском радаре некогерентного рассеяния проводилось зондирование ионосферы в режиме измерения мощности рассеянного сигнала (точнее – отношения мощностей сигнал/шум) с временным разрешением 1 мин и высотным – 10 км. Цель эксперимента – регистрация ионосферных ракетных возмущений. В 2218 (здесь и далее время LT) с космодрома Байконур с помощью РН “Протон-К” осуществлен запуск спутника глобальной навигационной системы “Глонас-М”.

На рис. 1 представлен график относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы для высот 290 – 410 км в период времени с 2100 до 2350 (нижняя кривая соответствует высоте 290 км, верхняя – высоте 410 км) и график усредненной по всем высотам скользящей по 10 точкам дисперсии. Время запуска отмечено стрелкой.

Как видно из графиков, незначительный флуктуационный фон наблюдался с 2100 до 2220. Уровень дисперсии этих флуктуаций составлял примерно 0,25 отн. ед. Через 8 мин после запуска (в 2226) дисперсия флуктуаций начинает возрастать и достигает максимальной величины (~0,45 отн. ед.) в 2236, т.е. через 18 мин после старта ракеты, после чего начинает уменьшаться. В 2246 уровень флуктуаций возвращается к

естественному фону. Учитывая, что временное окно вычисления дисперсии составляет 10 мин, время существования повышенного уровня флуктуаций сечения рассеяния в этом случае составляет около 10 мин.

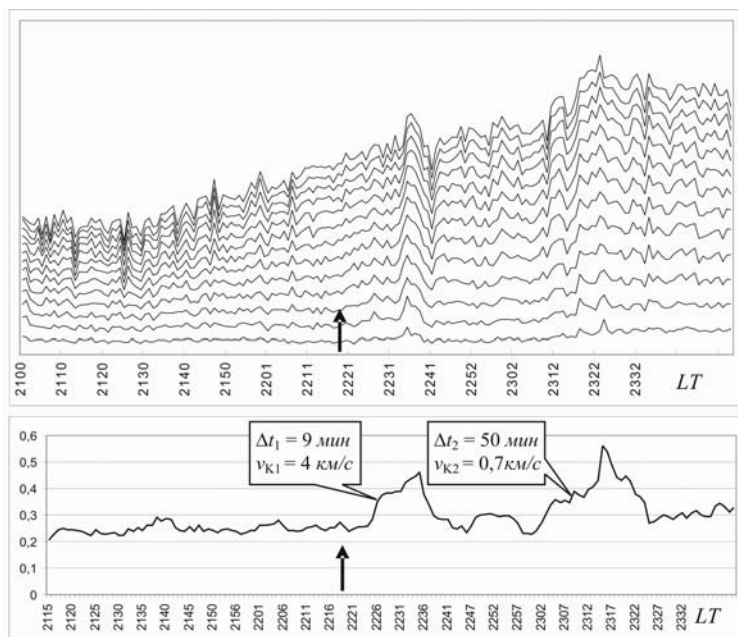


Рис. 1 – Относительное сечение рассеяния ионосферной плазмы на высотах 290 – 410 км над Харьковом 25 декабря 2006 г. (верхняя панель) и усредненная по высотам скользящая дисперсия по 10 точкам относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы (нижняя панель). Запуск РН “Протон-К” осуществлен в 2218

Второй максимум дисперсии флуктуаций сечения рассеяния ионосферной плазмы наблюдался, примерно, через 40 мин после запуска. Он начинается в 2300 и достигает максимального значения (~0,55 отн. ед.) в 2315. Затем величина дисперсии начинает уменьшаться и достигает фонового уровня около 2330. Таким образом, продолжительность этого максимума составляет 30 мин, или, с учетом временного окна вычисления дисперсии – 20 мин.

Ионосферные возмущения, зарегистрированные после старта РН “Союз-2-16”. Краткие сведения о ракете. “Союз-2-16” – ракета-носитель среднего класса, предназначенная для выведения космических аппаратов на орбиту Земли. Масса полезного груза, выводимая на круговую орбиту высотой 200 км с наклонением 51° – 7,1 т. Стартовая масса – 313 т. Тяга

двигательной установки: первой ступени – 821 кН, второй ступени – 780 кН, третьей ступени – 300 кН. Продолжительность работы двигателей первой ступени составляет 120 – 140 с, второй – 285 – 320 с, третьей – 300 с. Общее максимальное время работы маршевых двигателей – около 12 мин. Запуски осуществляются с космодромов Байконур и Плесецк.

27 декабря 2006 года с космодрома Байконур ракетой-носителем “Союз-2-1б” (первый пуск) выведен на орбиту французский космический телескоп *COROT*. Старт произведен в 1623. Зондирование ионосферы на радаре НР осуществлялось в том же режиме, что и 25 декабря. На рис. 2 приведен график сечения рассеяния для высот 100 – 300 км в период времени с 1600 до 1800 и график усредненной по всем высотам скользящей дисперсии флуктуаций сечения рассеяния.

Как видно из графика, существенные вариации сечения рассеяния наблюдались в основном в верхней части высотного интервала 100 – 300 км, т.е. на высотах выше 200 км. Фоновый уровень флуктуаций в этот день составлял примерно 0,15 отн. ед. Первое существенной увеличение дисперсии флуктуаций зарегистрировано с 1626 до 1643 с максимумом в 1633. Значение дисперсии в максимуме примерно в 1,6 раза превышало фоновый уровень. С 1653 до 1712 зарегистрировано второе увеличение дисперсии флуктуаций, максимальное значение которого в 2,3 раза выше фонового уровня. Последнее в данном эксперименте значительное возрастание относительного сечения рассеяния наблюдалось с 1728 до 1741. Дисперсия флуктуаций сечения рассеяния примерно в 2,2 раза превысила фоновый уровень.

Анализ результатов. В экспериментах, результаты которых представлены выше, зарегистрировано увеличение дисперсии флуктуаций сечения рассеяния ионосферной плазмы над Харьковом после запусков мощных ракет-носителей на расстоянии 2100 км. Следует сразу же отметить, что связь между этими событиями (запуском ракеты и интенсивностью флуктуаций) только временная. Для установления причинно-следственной связи нужна другая экспериментальная база. По этой же причине нет возможности по представленным данным определить реальную скорость распространения возмущений. Во-первых, неизвестна среда их распространения (нейтральный газ атмосферы или ионосфера), и, во-вторых, неизвестен момент генерации волн, переносящих возмущение. Поэтому, говоря здесь о скорости распространения возмущений, мы будем иметь в виду кажущуюся скорость, определяемую по расстоянию от космодрома до Харькова и времени задержки регистрации возмущения по уровню половины максимума от момента старта.

В обоих экспериментах первое возмущение зарегистрировано через несколько минут после момента старта (25 декабря – $\Delta t_1 = 9$ мин; 27 декабря –

$\Delta t_1 = 6$ мин). Кажущиеся скорости распространения возмущений равны, соответственно, $v_{K1} = 4$ км/с и $v_{K1} = 5$ км/с. Их длительности также примерно равны и составляют около 20 мин. С учетом 10-минутного окна вычисления дисперсии

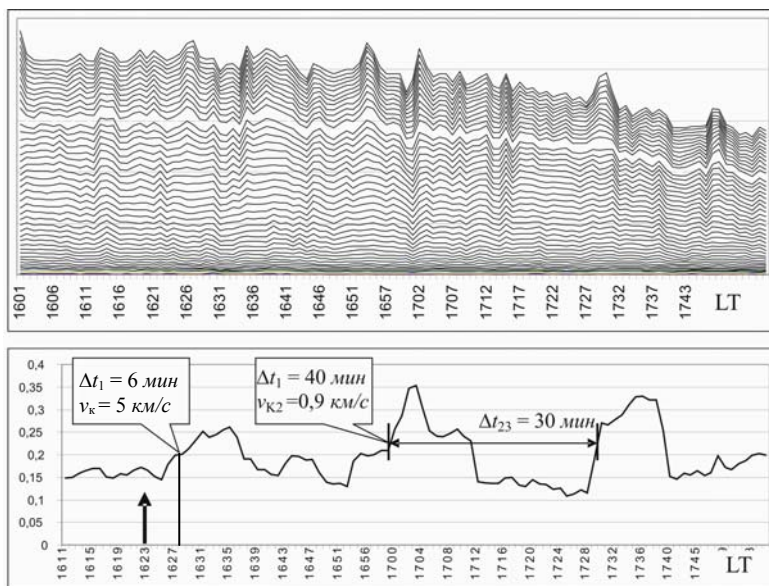


Рис. 2 – Относительное сечение рассеяния ионосферной плазмы на высотах 100 – 300 км над Харьковом 27 декабря 2006 г. (верхняя панель) и усредненная по высотам скользящая дисперсия по 10 точкам относительного сечения рассеяния ионосферной плазмы (нижняя панель). Запуск РН “Союз-2” осуществлен в 1623

реальная длительность существования возмущений составляет около 10 мин.

Второе возмущение 25 декабря наблюдалось через $\Delta t_2 = 50$ мин после запуска, а 27 декабря – через $\Delta t_2 = 40$ мин. Соответственно, кажущиеся скорости этих возмущений составляют 0,7 км/с и 0,9 км/с. В эксперименте 27 декабря примерно через 30 мин после второго зарегистрировано также и третье возмущение такой же интенсивности.

На основе представленных здесь экспериментальных данных о физической природе наблюдаемых возмущений можно высказать следующие предположения. Первые по времени возмущения вызываются распространяющимися в ионосфере медленными магнитогидродинамическими волнами, которые, как известно, на ионосферных высотах имеют скорости в несколько км/с. По-видимому, такие волны генерируются факелом работающих ракетных двигателей. В пользу этого предположения говорит

совпадение времени работы двигателей РН “Протон” и “Союз” (10 – 12 мин) и продолжительности регистрации возмущений.

Второе возмущение имеет кажущуюся скорость около 1 км/с; примерно с такой скоростью на ионосферных высотах распространяются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Их периоды на высотах 200 – 300 км могут составлять 25 – 120 мин. Третье возмущение, зарегистрированное в эксперименте 27 декабря, по-видимому, является вторым периодом распространяющейся ВГВ. Если это так, то период основной гармоника волны равен примерно 30 мин, что также соответствует теоретическим представлениям.

Из графиков на рис. 1 и 2 видно, что в обоих случаях дисперсия флуктуаций сечения рассеяния увеличивается примерно в 2 раза. Это значит, что интенсивность флуктуаций в точке наблюдения не зависит от мощности возмущающего фактора, т.к. суммарная тяга двигателей РН “Протон-К” почти на порядок больше, чем у РН “Союз-2”.

Вызывает также интерес вопрос о причине, вызывающей изменение величины сечения рассеяния. Согласно формуле (1) сечение рассеяния может изменяться из-за изменения электронной концентрации или отношения кинетических температур электронов и ионов ионосферной плазмы. Также сечение рассеяния может увеличиваться при образовании мелкомасштабных неоднородностей в рассеивающем объеме. Прохождение возмущающей волны может вызывать в рассеивающем объеме незначительную турбулизацию плазмы. Если пространственный масштаб турбулентностей будет сравним с длиной зондирующей волны, то сечение рассеяния среды увеличится за счет появления когерентной составляющей (аналог рассеяния Вульфа-Брэгга в кристаллографии).

Выводы. Предложена методика обработки данных зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния с целью обнаружения и регистрации ионосферных возмущений, вызываемых запусками мощных ракет-носителей на расстоянии в несколько тысяч километром от места старта. Методика дает возможность регистрировать вариации сечения рассеяния ионосферной плазмы искусственного происхождения на фоне естественных флуктуаций в том случае, если интенсивность первых вариаций несколько больше, чем вторых. Эта методика не позволяет с достаточной точностью определять момент появления возмущения в точке наблюдения, но сам факт наличия возмущения, как показывают многочисленные примеры, с ее помощью устанавливается достаточно надежно.

Список литературы: 1. Перемещающиеся ионосферные возмущения, обнаруженные методом некогерентного рассеяния / В.И. Таран, Ю.И. Подьячий, В.И. Головин, В.И. Ващенко, И.Д. Аркадьев // *Ионосферные исследования*. – 1979. – № 27. – С. 102. 2. Об одном типе крупномасштабных возмущений в ионосфере / В.Д. Карлов, С.И. Козлов, В.П. Кудрявцев, В.И. Новожиллов, Г.Н. Ткачев // *Геомагнетизм и аэронавигация* – 1983. – № 2. – С. 319. 3. Долгопериодные возмущения ионосферы техногенного происхождения / В.И. Таран,

Ю.И. Подъячий, А.А. Макашов // Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1991. – Вып. 1. – С. 32. 4. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводящих на орбиту космические аппараты / П.М. Нагорский, Ю.Е. Таращук // Изв. вузов. Физика. – 1993 – № 10. – С. 98. 5. Ионосферно-магнитосферные эффекты запусков ракет в сторону высоких широт / М.Г. Деминов, В.Н. Ораевский, Ю.Я. Ружин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2001. – Т. 41. № 6. – С. 772. 6. Регистрация ионосферных откликов на ударно-акустические волны, генерируемые при запуске ракет-носителей / Э.Л. Афраимович, Н.П. Перевалова, Плотицкий А. В. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2002. – Т. 42. – №6. – С. 790. 7. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет "Союз" и "Протон" / В.П. Бурмака, Л.Ф. Черногор, Ю.В. Черняк // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 3. – С. 254. 8. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур / В.П. Бурмака, В.Н. Лысенко, Л.Ф. Черногор, Ю.В. Черняк // 2006. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т. 46, № 6. – С.783. 9. Флуктуации геомагнитного поля вблизи г.Харькова, сопровождавшие старты ракет с космодрома Байконур / Черногор Л.Ф. // 2009. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т.49, № 3, С.403. 10. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов / Л.Ф. Черногор // 2008. – Геомагнетизм и аэронавигация. – Т. 48, № 5. – С. 681. 11. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе / В.П. Бурмака, С.В. Панасенко, Л.Ф. Черногор // 2007. – Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника. – № 11. – С.1. 12. Radiophysical observations of ionosphere disturbances generated by heavy class launch vehicle start / Yu. Pod'yachiy, V. Lisenko, Yu. Chernyak // 2008. – Reports of XIX General assembly of URSI.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.388.2

Ракетные возмущения ионосферы по данным зондирования методом некогерентного рассеяния / Ю.И. Подъячий // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 33 (1066). – С. 71-79. Бібліогр.: 12 назв.

Запропоновано методику обробки даних зондування іоносфери методом некогерентного розсіяння з метою виділення збурень перетину розсіяння іоносферної плазми після стартів потужних ракет-носіїв. Наведено приклади обробки реальних даних зондування іоносфери над Харковом під час запусків ракет з космодрому Байконур.

Ключові слова: іоносфера, некогерентне розсіяння, іоносферні збурення, запуски ракет, методики обробки даних зондування.

The method of processing of data of sounding of ionosphere the method of non-coherent scatter is offered with the purpose of selection of perturbation of section of dispersion of ionosphere plasma after the starts of powerful rockets. The examples of processing of the real data of sounding of ionosphere are resulted over Kharkov during the starts of rockets from a space center Baikonur.

Keywords: ionosphere, incoherent scattering, ionospheric disturbances, missile launches, sensing data processing technique.